

呼伦湖沉积物有机碳的分布特征

宋文杰¹, 何江^{1,2*}, 高际玫³, 吕昌伟^{1,2}, 王维^{1,2}, 樊明德^{1,2}, 张家震^{1,2}

(1.内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2.内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021; 3.内蒙古环境监测中心站, 呼和浩特 010011)

摘要:以内蒙古高原湖泊呼伦湖为对象,开展了湖泊沉积物有机碳的分布特征研究。结果表明:呼伦湖沉积物中总有机碳(TOC)含量范围为 9.18~61.68 g·kg⁻¹,平均 34.64 g·kg⁻¹;重组碳(HFOC)含量范围为 9.02~61.47 g·kg⁻¹,平均 34.32 g·kg⁻¹;轻组碳(LFOC)含量范围为 0.02~0.86 g·kg⁻¹,平均 0.32 g·kg⁻¹。TOC 在空间分布上呈现从北西向南东逐渐递减的趋势。表层沉积物中 C/N 的平均值为 20.35,表明呼伦湖中有机质的多源性。

关键词:有机碳;分布;沉积物;湖泊

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2336-05

Characteristics of Organic Carbon Distribution in the Sediment of Hulunhu Lake, China

SONG Wen-jie¹, HE Jiang^{1,2*}, GAO Ji-mei³, LÜ Chang-wei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, FAN Ming-de^{1,2}, ZHANG Jia-zhen^{1,2}

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 3.Inner Mongolia Environment Monitoring Center Station, Huhhot 010011, China)

Abstract: The total organic carbon (TOC) plays an important role in carbon cycles. TOC can be divided into light-fraction organic carbon (LFOC) and heavy-fraction organic carbon (HFOC) using the density fractionation technique recently, LFOC consists of visible partly decomposed plant material at various stage of decomposition, includes spore, seed, animal and microbial debris and some soil minerals particle associated with plant debris. It is a good indicator for labile organic carbon. And HFOC consists of humus, existing as stable carbon pool. This study was carried out about the characteristics organic carbon distributions in the sediment of Hulunhu lake, which is the shallow lake in arid areas within the Mongolian Plateau. The results indicated that the content of TOC ranged from 9.18 to 61.68 g·kg⁻¹, with the average of 34.64 g·kg⁻¹; the content of HFOC ranged from 9.02 to 61.47 g·kg⁻¹, with the average of 34.32 g·kg⁻¹; and the content of LFOC ranged from 0.02 to 0.86 g·kg⁻¹, with the average of 0.32 g·kg⁻¹. The content of TOC showed a decreasing trend from northwest to southeast in spatial distribution. The mean C/N ratio of the sediment was 20.35 in the surface sediments of Hulunhu lake, Which meant that the source of organic matter was diverse.

Keywords: organic carbon; distributions; sediment; lake

湖泊碳循环是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。湖泊沉积物是有机碳的重要蓄积库,在全球碳循环中扮演重要角色^[1-2]。沉积物中的有机质可分为轻组有机质(LFOM,比重<1.7)和重组有机质(HFOM,比重>1.7)^[3]。轻组有机质是具有高碳氮比的非矿物有机质^[4-5],与矿物相比,具有较高的周转速率和碳氮比及较低的相对密度,被认为是土壤(沉积物)中的易分解碳库^[6];重组有机质是轻组有机质彻底分解后残留的

或重新合成的、以芳香族物质为主体的有机质(主要是腐殖质)。湖泊沉积物中有机质组分的研究对碳循环机制研究具有重要意义。本文以内蒙古高原湖泊呼伦湖为研究对象,开展了湖泊沉积物中有机碳的组成及分布特征研究,以期对内蒙古自治区湖泊湿地资源的合理开发与保护利用提供科学依据,并为与湿润区湖泊的对比研究积累基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

呼伦湖(116°58'~117°47'E,48°40'~49°20'N)地处温带半干旱大陆性气候高纬度地区,是我国纬度最高的湖泊,是亚洲中部干旱地区最大的淡水湖,已列入

收稿日期:2011-03-28

基金项目:国家自然科学基金(40863003);内蒙古自然科学基金;内蒙古大学“科技创新团队”基金

作者简介:宋文杰(1985—),女,硕士,主要研究方向为环境地球化学及湿地科学。

* 通讯作者:何江 E-mail:ndjhe@imu.edu.cn

国际重点湿地名录并被联合国教科文组织接纳为世界生物圈保护区,不仅是我国东北部重要淡水渔业水域,也是我国东北部以保护草原生态、湿地系统和珍稀濒危鸟类为主的最大综合性自然保护区。呼伦湖地区多年平均气温为 -0.24°C ,每年7月最高,平均值为 20.34°C ;每年1月最低,平均值为 -22.58°C 。呼伦湖主要补给水源为源于蒙古国东部的克鲁伦河、连接贝尔湖和呼伦湖的乌尔逊河以及海拉尔河,排泄河流为中俄界河—额尔古纳河,并经额尔古纳河外流入鄂霍茨克海。湖区东北部的新开河为吞吐性河流,高水位时,海拉尔河通过新开河补给呼伦湖。呼伦湖历史最大蓄水量为 138.5亿 m^3 、最大面积 $2\,300\text{余 km}^2$ 。近40多年以来,由于气候变化和人类活动的影响,水源补给河流水量减少,致使湖泊水位逐年下降、水面减小、湿地萎缩、湖水盐碱、氟、氨氮等严重超标。

1.2 样品采集

依据《湖泊生态系统观测方法》,针对湖泊现有水

域面积及湖泊生态系统类型,于2008年8月对呼伦湖进行了系统的现场监测和样品采集。表层沉积物和沉积物柱芯用挪威 Swedaq 公司产 KCmod-AochB 型无扰动采样器采集,沉积物柱芯现场以 2 cm 间隔分层。沉积物样品装入聚乙烯塑料袋封口后冷藏,带回实验室于 -24°C 冷冻保存。采样站位用GPS定位,并结合地形图进行校正(图1)。

1.3 分析方法

轻、重组有机碳的分离采用改进的比重法^[7];有机质采用重铬酸钾氧化外加加热法^[8]测定(FHZDZTR-0046);全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法(FHZDZTR-0049)测定。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中有机碳的分布特征

表层沉积物中 TOC 的含量在 $9.18\sim 61.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间(表1),空间分布总体呈现由北西向南东逐渐递

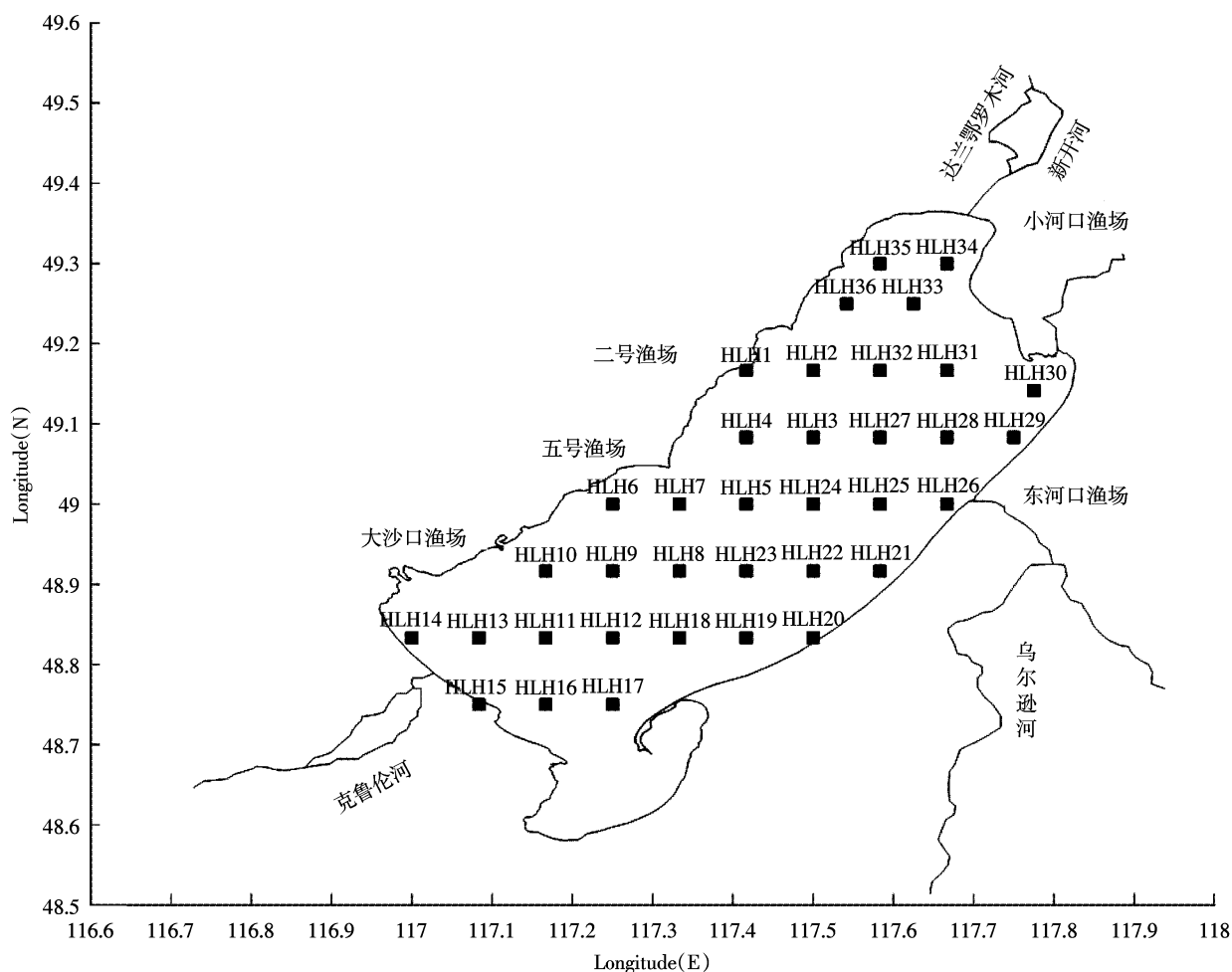


图1 采样点分布示意图

Figure 1 Location of sampling site in Hulunhu lake

减的趋势(图 2)。原因可能有两方面:一方面,湖泊北西位置为新开河流入湖处,并有渔业工作区(小河口渔场),湖泊沉积物中有机质受来自新开河河流携带的生活污水和牲畜粪便等陆源输入的影响,造成北西湖区表层沉积物中 TOC 含量较高,同时资料显示呼伦湖西北岸线长达 150 km,西北部半干旱草原的入湖干草约达 3 350 t,由于常年降水对地表的淋溶冲刷,有相当量的可溶性养分和颗粒物质被冲入湖中,造成面污染源负荷^[9];另一方面,北东湖区为深水区,南西湖区为浅水区^[10],不同水深湖区氧化还原环境有较大差异,深水区域由于大气复氧较难到达湖底,属还原环境,有机质难以分解,形成深水区为 TOC 高值区,浅水区为 TOC 低值区的空间分布特征。

表层沉积物中重组碳(HFOC)的含量在 9.02~61.47 g·kg⁻¹之间(表 1),平均 34.32 g·kg⁻¹,占 TOC 的 97.31%~99.9%。HFOC 的空间分布与 TOC 基本相同(图 3),这与 HFOC 为 TOC 的主导形态有关,原因与 TOC 空间分布原因一致。表层沉积物中轻组碳(LFOC)含量在 0.02~0.86 g·kg⁻¹之间(表 1),平均

0.32 g·kg⁻¹,LFOC 仅占 TOC 的 0.05%~3.44%。空间分布上,LFOC 表现为由北东向南西逐渐降低的趋势(图 4),LFOC 主要由不同分解程度的植物残体和一些微生物结构体构成,分解速率快,是相对不稳定的活性碳组分。Ruilin Wen^[10]的研究表明湖区北东方向为湖区深水区,有机质含量较高,沉积植物残体相对较高。根据李执强等^[11]解释,土壤轻组有机质含量的分布不仅与年均温、降雨量及有效积温有关,而且与水热比有密切关系。高比例的 HFOC 和低比例 LFOC 说明重组有机质为湖泊沉积物有机质的主要组成部分,呼伦湖表层沉积物中有机碳库相对稳定。

2.2 沉积柱芯中有机碳组分的分布特征

3 个站位沉积柱芯中 HFOC 含量垂向上表现出随深度增加而逐渐递减的趋势(图 5),但 HLH8 波动相对较小,HLH1 和 HLH3 变化波动较大,且表层沉积物中 HFOC 含量高,与 LFOC 的垂向变化正好相反,HFOC 与 LFOC 表现较为明显的消长关系。此外,HLH8 中 HFOC 和 LFOC 的含量均明显高于其他 2 个柱芯,这是因为 HLH8 站位(4.1 m)的水深较 HLH1(3.2 m)和 HLH3(3.1 m)站位深,还原环境相对较强,有机质相对难以分解。

HLH1、HLH3 和 HLH8 沉积柱芯中 LFOC 同样表现随深度增加而递减的趋势(图 6),但垂向分布上仍表现一定差异。HLH1 和 HLH3 的 LFOC 含量整体缓慢渐变,HLH8 站位 LFOC 则变化波动较大,3 个柱芯曲线垂向上变化的不同仍与湖泊沉积物中有机碳来

表 1 呼伦湖表层沉积物中有机碳不同组分含量(g·kg⁻¹)
Table 1 Speciation concentration of organic carbon in Hulunhu surface sediments(g·kg⁻¹)

参数	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average
TOC	61.68	9.18	34.64
LFOC	0.86	0.02	0.32
HFOC	61.47	9.02	34.32

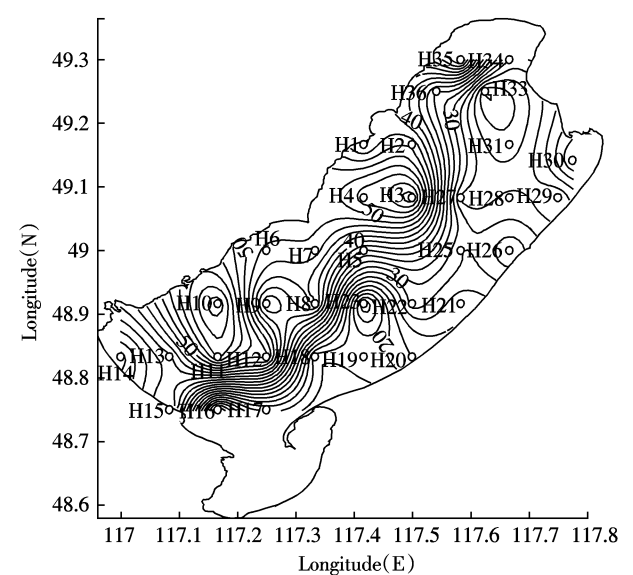


图 2 呼伦湖表层沉积物 TOC 水平分布格局
Figure 2 Horizontal distribution of total organic carbon in surface sediments of Hulunhu lake

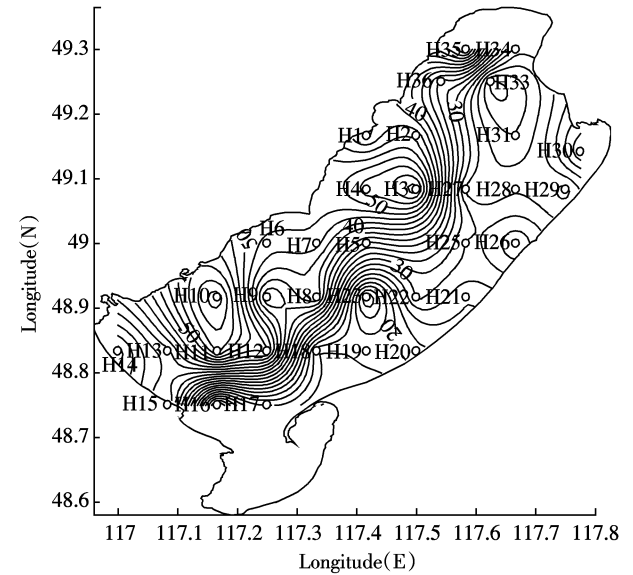


图 3 呼伦湖表层沉积物 HFOC 水平分布格局
Figure 3 Horizontal distribution of heavy-fraction organic carbon in surface sediments of Hulunhu lake

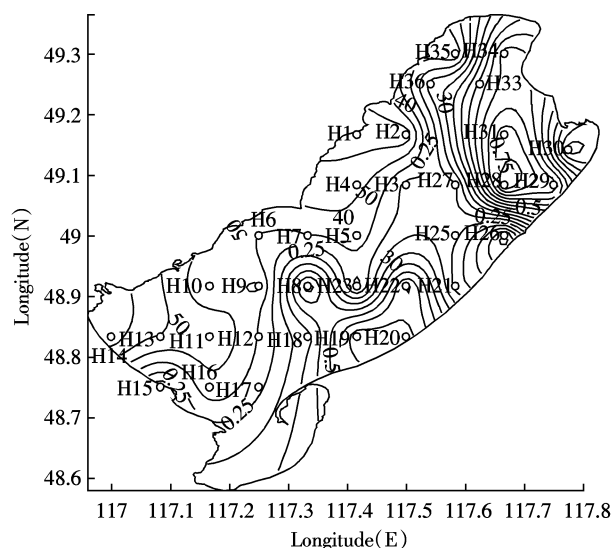


图4 呼伦湖表层沉积物 LFOC 水平分布格局

Figure 4 Horizontal distribution of light-fraction organic carbon in surface sediments of Hulunhu lake

源的复杂性有关。由于呼伦湖为开放性湖泊,每年随克鲁伦河、乌尔逊河和海拉尔河入湖的植物碎屑以及悬浮有机物都占有一定比例^[12],不同湖区不同历史时

期接受的陆源输入以及内源沉积的 LFOC 含量不均匀,导致 LFOC 在 3 个柱芯中的垂向分布存在一定差异。垂向上,3 个柱芯 LFOC 含量在 10~30 cm 处明显高于在 0~10 cm,且峰值出现在 20~30 cm 层内,一方面这与 LFOC 在沉积物剖面中的分布有所不同有关,另一方面,因呼伦湖水深一般小于 5 m,湖泊表层沉积物易受风浪影响而发生再悬浮,沉积物中的 LFOC 被上覆水中的溶解氧分解,导致表层 0~10 cm 沉积物中的 LFOC 含量较低。

2.3 有机碳和全氮的比值分析

沉积物的 C/N 值可有效指示有机质的来源^[13]。通常,有纤维束植物碎屑的 C/N 值大于 20,无纤维束植物的 C/N 值为 4~12。许多湖泊表层沉积物的 C/N 值为 6~14^[14-15]。因此,可利用 TOC/TN 定性判识沉积物中有机质的来源^[16]。

呼伦湖表层沉积物中,C/N 值介于 4.38~81.72 之间,平均 20.35,C/N 值的变化幅度较大,反应呼伦湖表层沉积物中有机质的多源性。值得注意的是,位于湖边的 HLH21、HLH26、HLH30 和 HLH34 站位,C/N 值分别高达 54.00、68.23、81.72 和 36.04,揭示了陆源

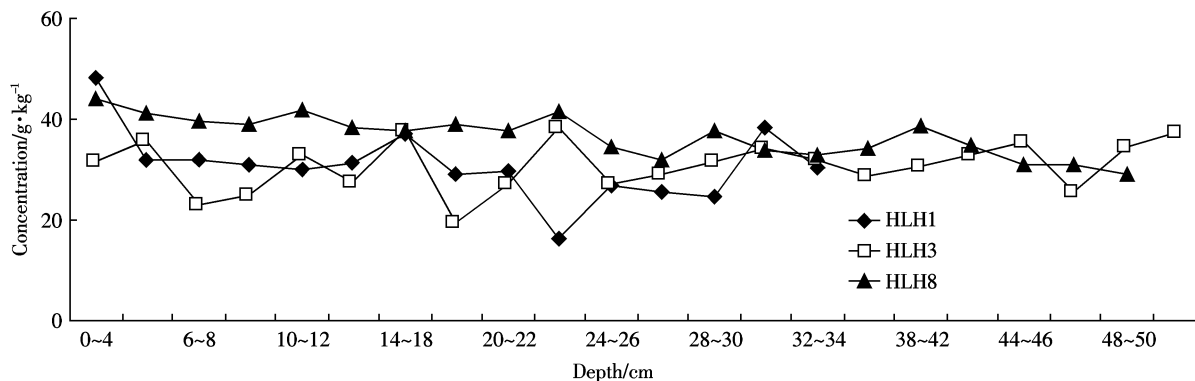


图5 呼伦湖沉积物柱芯中 HFOC 垂向分布

Figure 5 The vertical distribution of heavy-fraction organic carbon in Hulunhu sediment cores

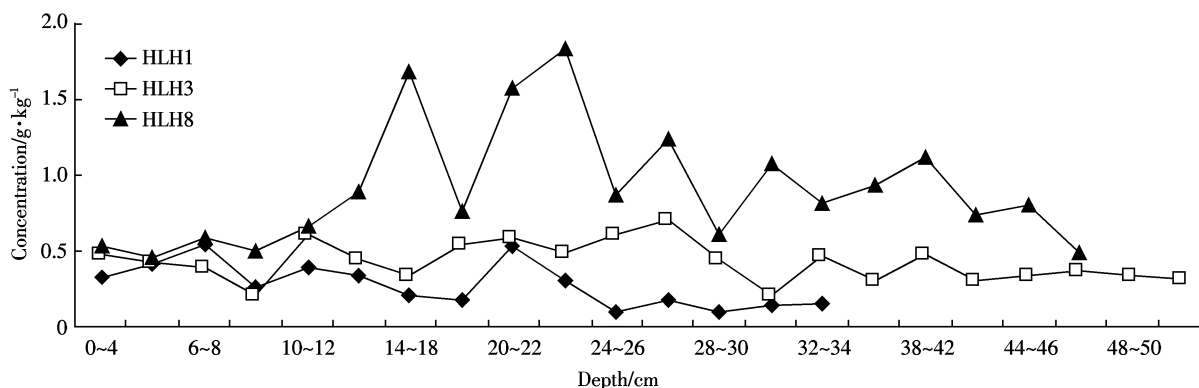


图6 呼伦湖沉积物柱芯中 LFOC 垂向分布

Figure 6 The vertical distribution of light-fraction organic carbon in Hulunhu sediment cores

高等植物输入对沉积物中有机质来源的贡献率^[17]。

3 结论

呼伦湖表层沉积物中 TOC 以稳定的 HFOC 为主, HFOC 占 TOC 的 99% 以上, 对 TOC 的积累有重要作用, LFOC 含量较低, 表明呼伦湖有机碳库稳定。沉积柱芯中有机碳组分均随深度增加而递减, 但渐变程度不同, 这可能与湖泊有机碳来源以及不同湖区位置有关。沉积物中 C/N 值变化幅度较大, 揭示呼伦湖沉积物中有机质的多源性。

参考文献:

- [1] 陈浮勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社 2004. CHEN Fu-qin, HUANG Yao, YU Gui-rui. Earth system carbon cycle [M]. Beijing: Science Press 2004.
- [2] 刘清玉, 戴雪荣, 王立群. 巢湖沉积物有机碳分布变化特征[J]. 上海地质, 2008(1): 13-17. LIU Qing-yu, DAI Xue-rong, WANG Li-qun. The distribution characteristics of organic carbon in sediments of the Chaohu Lake [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2008(1): 13-17.
- [3] Janzen H H, Campbell C A, Brabds A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799-1806.
- [4] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 土壤轻组有机质研究进展[J]. 福建林学院学报, 2006, 26(3): 281-288. XIE Jin-sheng, YANG Yu-sheng, XIE Ming-shu, et al. Advance of research on light fraction organic matter in soil[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2006, 26(3): 281-288.
- [5] 杨春霞, 王圣瑞, 金相灿, 等. 轻组有机质对太湖沉积物氮、磷矿化的影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(9): 1001-1007. YANG Chun-xia, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Effect of light fraction organic matter on mineralization of N and P in Taihu Lake sediments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(9): 1001-1007.
- [6] 安树青. 湿地生态工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. AN Shu-qing. Wetland ecological engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [7] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799-1806.
- [8] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 56-60. ZHANG Wen-ju, PENG Pei-qin, TONG Cheng-li, et al. Characteristics of distribution and composition of organic carbon in Dongting Lake floodplain[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2005, 26(3): 56-60.
- [9] 韩向红, 杨持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析[J]. 自然资源报, 2002, 17(6): 685-687. HAN Xiang-hong, YANG Chi. Hulunhu Lake self-purification function and its role in the analysis of regional environmental protection[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 685-687.
- [10] Wen Ruilin, Xiao Jule, Chang Zhigang, et al. Holocene climate changes in the mid-high-latitude-monsoon margin reflected by the pollen record from Hulun Lake, northeastern Inner Mongolia[J]. *Quaternary Research*, 2009, 73(2010): 293-303.
- [11] 李执强, 汪景宽, 曹宏杰, 等. 水热梯度变化及不同施肥处理对东北地区土壤轻组有机碳、氮的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1014-1017. LI Zhi-qiang, WANG Jing-kuan, CAO Hong-jie, et al. Effect of gradients of precipitation and temperature and fertilization on light fraction organic carbon and nitrogen of soils in Northeastern China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5): 1014-1017.
- [12] Lee S Y. Primary productivity and particulate organic matter flow in an estuarine mangrove-wetland in Hong Kong[J]. *Marine Biology*, 1990, 106(3): 453-463.
- [13] 陈敬安, 万国江. 云南程海现代沉积物环境记录研究[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 112-116. CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang. Environmental records in recent sediments of Lake Chenghai, Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(2): 112-116.
- [14] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494-1498. BAI Jun-hong, DENG Wei, ZHU Yan-ming, et al. Spatial distribution characteristics and ecological effects of carbon and nitrogen of soil in Huolin River catchment wetland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1494-1498.
- [15] Mayer L. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [16] 姚书春, 李世杰. 巢湖富营养化过程的沉积记录[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 343-347. YAO Shu-chun, LI Shi-jie. Sedimentary records of eutrophication for the last 100 years in Chaohu Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 343-347.
- [17] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海沉积物中有机质和全氮含量分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 620-624. SUN Hui-min, HE Jiang, LV Chang-wei, et al. Characteristics of organic carbon and total nitrogen distribution in the sediment of Wu-liangsuhai Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 620-624.